28670 DUP.
1.A.

IGM88TC-404-690-G
CNRC 28670

Transfert thermique dans un matériau formé de couches orthotropes

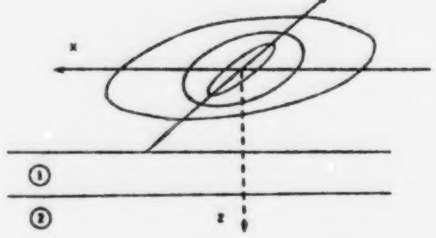
J.C. Krapez, P. Cielo

Conseil National de Recherches Canada
Institut de Génie des Matériaux
75, de Mortagne, Boucherville, Quebec, J4B 6Y4

En vue d'améliorer les propriétés physiques des polymères on leur ajoute souvent une charge : fibres de verre courtes dans des thermoplastiques, particules conductrices pour l'obtention d' "écrans" aux interférences électromagnétiques, fibres de carbone tissées pour des matériaux composites structuraux... Le moulage par injection, l'extrusion et le tissage des fibres induisent une orientation particulière du renforcement. De plus, lors de la mise en forme les contraintes peuvent génèrer une orientation des phases amorphes ou cristallines du polymère. Une anisotropie de structure est ainsi créée entrainant une anisotropie du transfert thermique plus ou moins marquée suivant les importances relatives des conductivités des espèces. Sa quantification passe par la mesure des diffusivités thermiques principales [1,2] ou simplement par la mesure du rapport de deux d'entre elles [3,4]: un échantillon plan de conductivités principales k_x,k_y,k_z soumis à un chauffage ponctuel sur sa surface y présente des isothermes elliptiques dont le rapport des axes vaut $(k_x/k_y)^{1/2}$. Une méthode de photothermie modulée a également été proposée [5]. L'application de ces procédures pour des matériaux inhomogènes n'a cependant pas été considérée (hormis [1] où est traité le cas d'un composite formé de couches orthotropes à symétrie de révolution).

La présente étude concerne le transfert thermique dans un matériau composé de plusieurs couches orthotropes infinies en x et y de conductivités principales k_{ix},k_{iy},k_{iz} avec une source ponctuelle sur la face z=0, dans le but d'analyser l'influence des variations de l'anisotropie $k_x(z)/k_y(z)$ sur la forme des isothermes à la surface.

Calcul de la fonction de Green dans le cas de deux couches orthotropes :



Pour une source ponctuelle au point $r_0(0,0,0)$ en surface du milieu ①, les équations à résoudre sont :

$$k_{1x}\frac{\delta^2 G_1}{\delta x^2} + k_{1y}\frac{\delta^2 G_1}{\delta y^2} + k_{1z}\frac{\delta^2 G_1}{\delta z^2} + \delta(r-r_0) = 0$$

$$k_{2x}\frac{\delta^2 G_2}{\delta x^2} + k_{2y}\frac{\delta^2 G_2}{\delta y^2} + k_{2z}\frac{\delta^2 G_2}{\delta z^2} = 0$$

conditions aux limites : $\frac{\delta G_1}{\delta z} = 0 \qquad z = 0$

$$\left.\begin{array}{l} k_{1z}\frac{\delta G_1}{\delta z} = k_{2z}\frac{\delta G_2}{\delta z} \\ G_1 = G_2 \end{array}\right] z = z_1$$

$$G_2 = 0 \qquad |r-r_0| \to \infty$$

Une méthode consiste à poser $G_1=2u_1+w_1$ avec u_1 fonction de Green correspondant au cas du milieu ① infini avec une source en r_0. A l'aide d'une double transformée de Fourier suivie de son inversion on obtient la répartition sur la surface chauffée :

$$G_1=2u_1+ C_1/\pi^2 k_{1z} \int\cos(\beta x)\int\cos(\gamma y) \frac{(\mu_1-\alpha\mu_2)e^{-2\mu_1 z_1}}{\mu_1((\mu_1+\alpha\mu_2)-(\mu_1-\alpha\mu_2)e^{-2\mu_1 z_1})}\, d\beta d\gamma$$

$$\mu_1=(\beta^2 k_{1x}/k_{1z}+\gamma^2 k_{1y}/k_{1z})^{1/2} \quad \alpha=k_{2z}/k_{1z} \quad E_1=(k_{1x}/k_{1y})^{1/2}$$

Les isothermes ne sont plus nécessairement elliptiques, on définit cependant leur excentricité par le rapport de leurs dimensions suivant x et y : Exc=x/y et l'excentricité normalisée $Exc^*=\log(Exc/E_1)/\log(E_2/E_1)$ .Ceci est justifié par le fait qu'à proximité du point chauffé l'anisotropie de ① imposera E_1 comme limite à Exc alors qu'à des distances élevées Exc tendra vers E_2 (si ② est semi-infini).

Sur les figures 1 et 2 sont portées les évolutions de Exc* dans le cas particulier $k_{1z}=k_{2z}=k_{1x}$ pour différentes valeurs de $E_1=1/E_2$. Le point correspondant à Exc*=0.5 (c'est à dire Exc=1) peut servir à l'identification de z_1, profondeur à laquelle survient un changement d'orientation.

La figure 3 porte les résultats du calcul analytique pour différents rapports d'épaisseurs z_2/z_1 avec $E_1=1/E_2=\sqrt{10}$ Dans le cas de deux couches d'épaisseurs égales, les isothermes voient leur excentricité Exc tendre vers 1 loin du point chauffé ce qui est représentatif du matériau isotrope "homogénéisé".

Lors du moulage par injection les contraintes de cisaillement et d'élongation donnent naissance à trois zones d'orientations priviligiées des fibres : près des parois

celles-ci sont parallèles à la direction de l'écoulement alors que près du plan médian elles sont plutôt perpendiculaires. Pour simuler l'analyse d'un tel composite le cas avec trois couches a également été traité pour $E_1=1/E_2=E_3=\sqrt{10}$ (fig. 4). A mesure que l'épaisseur relative de la zone de coeur décroit, les variations de l'excentricité commencent à se manifester à des distances plus grandes et voient leur amplitude se réduire, mais pour une proportion de 5% l'excentricité Exc* varie encore d'environ 8%

Les dimensions finies de la source et de la zone sur laquelle l'instrument de mesure moyenne la température viennent apporter des modifications aux courbes présentées jusqu'alors. En assimilant les fonctions de la source et de la détection par des gaussiennes de largeur w_s et w_d une étude de l'influence de $w=(w_s^2+w_d^2)^{1/2}$ sur l'évolution de l'excentricité a été menée dans le cas de deux couches avec le milieu ② semi-infini et $E_1=1/E_2=\sqrt{10}$ (fig. 5). Comparativement aux résultats de [3] (faisceau circulaire uniforme) l'influence de w/z_1 se fait sentir sur un domaine plus étendu.

Des résultats expérimentaux ont été obtenus avec deux échantillons de carbone-époxy 100x100x4mm^3; les fibres de l'un sont orientées dans une seule direction alors que celles de l'autre sont groupées en deux couches de directions principales orthogonales. Le chauffage de l'échantillon disposé horizontalement est réalisé par un laser Argon (disque irradié $\phi \approx 500\ \mu m$) et les températures sont mesurées a l'aide d'un détecteur InSb couplé à un objectif de caméra IR et placé sur une table x-y (variante avec thermographie décrite dans [6]). La figure 6 montre l'évolution des excentricités correspondantes. Après une portion commune dont la pente positive est due à $w > 0$, les excentricités se différencient: celle de l'échantillon "homogène" tend vers 3 (anisotropie ≈ 9) alors que l'autre tend vers 1 (milieu pseudo-isotrope associé).

La méthode thermique non-destructive utilisée jusqu'à présent pour caractériser une anisotropie supposée uniforme peut donc fournir des renseignements sur ses éventuelles variations en profondeur.

<u>Réferences</u>

1. M.Amazouz, Thèse de Docteur-Ingénieur, Nancy 1987
2. K.Katayama, 6th Int. Heat Transf. Conf. Toronto 1978, M6, p.85
3. M.Pietralla, Colloid & Polymer Sci., 259, 111 (1981)
4. M.A.Berrie et al., Plastics ans Rubber Processing and Applications, 1, 129 (1981)
5. G.Busse et al., Polymer Composites, 8, n°4, 283 (1987)
6. J.C.Krapez et al., Polymer Composites, 8, n°6, 396 (1987)

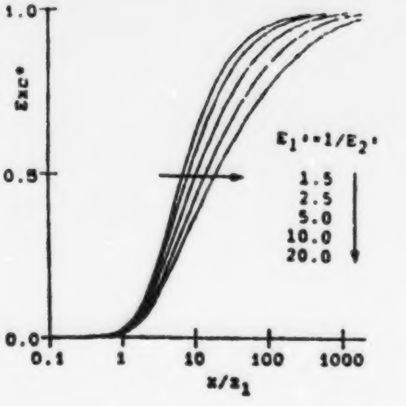


Fig. 1 :Intersection avec l'axe X

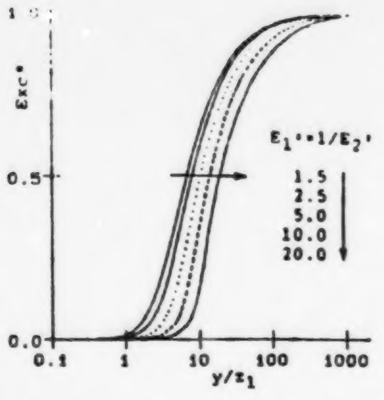


Fig. 2 :Intersection avec l'axe Y

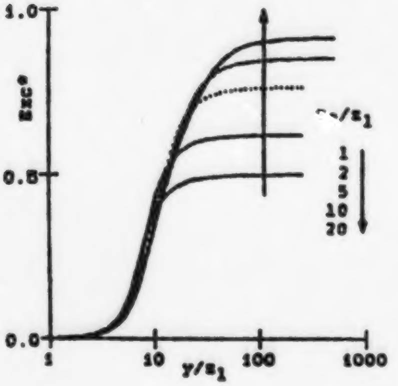


Fig. 3 :Deux couches d'épaisseurs finies

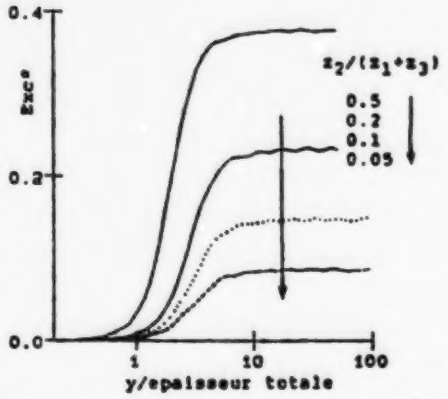


Fig. 4 :Trois couches avec $z_1=z_3$

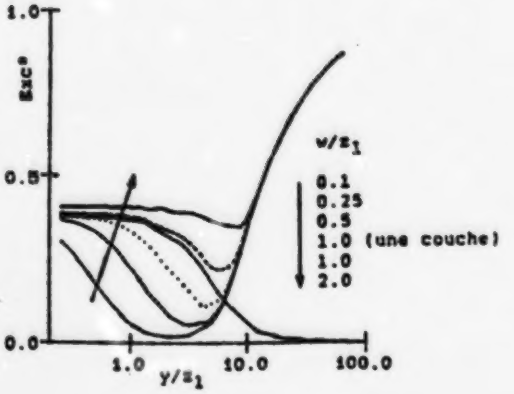


Fig. 5 :Influence de $w=w_s*+w_d*$

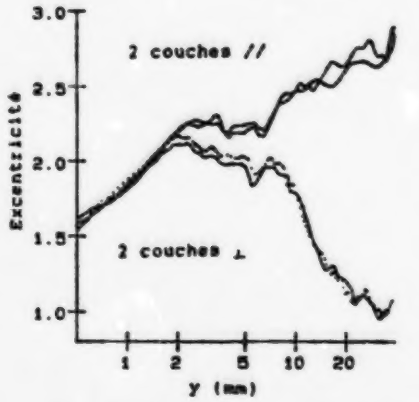


Fig. 6 :Résultats expérimentaux
avec du carbone-époxy